

## CREACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ENTRENAMIENTO A PARTIR DEL ANÁLISIS DE UN PROCEDIMIENTO DE ULTRASONIDO MEDIANTE METODOLOGÍA BORROSA

Jesús Domech More\*, Luiz Mamede Gonzalez Magalhães\*\*

\*Universidade Estácio de Sá. Mestrado em Administração e Desenvolvimento Empresarial. Avenida Presidente Vargas, 642 – 22º andar. Centro. Rio de Janeiro. CEP: 20071-001. Brasil

\*\*Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear. IBQN  
Av. General Justo 365, 4º andar, Centro, Rio de Janeiro, CEP: 20021-130. Brasil.

\*jesus.more@estacio.br, \*\* mamede@ibqn.com.br.

Recibido 27 de diciembre de 2007, aceptado 26 de febrero de 2008

---

### Resumen

En este trabajo se presentan dos modelos borrosos para la creación de estrategias de entrenamiento dirigidas a los inspectores que utilizan el ensayo no destructivo ultrasónico con el objetivo de evaluar la calidad de las soldaduras en las industrias. Las posibilidades de falla humana durante la ejecución del procedimiento PR-011 por parte de los inspectores son obtenidas a partir de un modelo de agregación de opiniones de expertos. Con esto se identifican las tareas más susceptibles a fallas humanas. El segundo modelo se aplica para analizar las incidencias de los procesos cognitivos del inspector en la correcta ejecución del procedimiento. Los resultados obtenidos ayudan a optimizar recursos de tiempo e información durante los entrenamientos de los inspectores.

**Palabras clave:** ensayo no destructivo, falla humana, procedimiento, números borrosos, entrenamiento, efectos olvidados.

---

## **CREATION OF TRAINING STRATEGIES FOR THE ANALYSIS OF ULTRASONIC PROCEDURE THROUGH FUZZY METHODOLOGY**

Jesús Domech More\*, Luiz Mamede Gonzalez Magalhães\*\*

\*Universidade Estácio de Sá. Mestrado em Administração e Desenvolvimento  
Empresarial. Avenida Presidente Vargas, 642 – 22º andar. Centro. Rio de  
Janeiro. CEP: 20071-001. Brasil

\*\*Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear. IBQN  
Av. General Justo 365, 4º andar, Centro, Rio de Janeiro, CEP: 20021-130.  
Brasil.

\*jesus.more@estacio.br, \*\* mamede@ibqn.com.br.

Received December 27<sup>th</sup> 2007, accepted February 26<sup>th</sup> 2008

---

### **Abstract**

Two fuzzy models are presented in order to create some training process strategies for inspectors that use ultrasonic nondestructive examinations to evaluate the welding quality in the industries. The human failure possibilities during the use of procedure by inspectors are obtained from an aggregation model that is used for combining the fuzzy opinion of each expert. With this, the most susceptible tasks to human failures are identified. The second model is applied to analyze the incidences of the cognitive processes of inspectors in the correct execution of the procedure. The obtained results help to optimize resources of time and information during the training of the inspectors.

**Keywords:** nondestructive inspection, human failure, procedure, fuzzy numbers, training, forgotten effects

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El ensayo no destructivo (END) por ultrasonido tiene como objetivo detectar defectos o discontinuidades internas presentes en los más variados tipos o formas de materiales ferrosos o no ferrosos, metálicos o no metálicos. Muchas veces, tales defectos son característicos del propio proceso de fabricación de las piezas o del componente a ser examinado, como por ejemplo: bolas de gas en fundidos, doble laminación en laminados, micro grietas en forjados, inclusiones de escoria en uniones soldadas y otras.

El haz ultrasónico de características compatibles con la estructura del material a ser ensayado es introducido en una dirección favorable en relación a la discontinuidad (*interfase*) y, si se refleja debido a la existencia de alguna discontinuidad, será mostrado en la pequeña pantalla del equipamiento un eco en forma de pico. Simultáneamente sensores adecuados irán a detectar las reflexiones provenientes del interior de la pieza examinada, localizando y caracterizando esas discontinuidades. Algunas discontinuidades superficiales también pueden ser detectadas con este tipo de ensayo no destructivo.

Existen varios métodos y técnicas de inspección, tales como el método pulso-eco, método por transparencia, método por resonancia, técnica por contacto, técnica por inmersión, inspección manual e inspección automática. Al mismo tiempo las informaciones obtenidas en los sistemas de inspección pueden ser representadas por varios tipos de dispositivos. En este trabajo nos referimos al método pulso-eco, a la técnica por contacto y a la inspección manual.

En el método pulso-eco, el transductor emite pulsos de energía ultrasónica que son introducidos en el material durante intervalos regulares de tiempo, a través de un acoplante. Si los pulsos encuentran una superficie reflectora, parte o toda la energía es reflejada y retorna al transductor que convierte las vibraciones en energía eléctrica y la transforma en señal en la pantalla del equipamiento. Tanto la cantidad de energía reflejada como el tiempo recorrido entre la transmisión del pulso inicial y la recepción son medidos por el equipamiento. Este proceso de emisión y recepción de pulsos de energía ultrasónica es repetido para cada pulso sucesivo.

La técnica de inspección por ultrasonido se utiliza en instalaciones, tuberías y materiales normalmente sometidos a requisitos de alta seguridad y que requieren una alta confiabilidad, tales como centrales nucleares, plantas petroquímicas, plataformas de petróleo, aeronaves, navíos, embarcaciones, tanques de combustibles y vehículos de

transporte, entre otras. Hoy en día, el examen por ultrasonido constituye una herramienta indispensable para la ingeniería de seguridad y la garantía de calidad de piezas de gran espesor, geometría compleja de juntas soldadas, chapas, etc.

Así como todo ensayo no destructivo, este examen posee limitaciones que atentan contra los niveles de confiabilidad. A pesar de poseer ventajas como el gran poder de penetración, la alta sensibilidad (detecta discontinuidades de 0,5 mm o menores), la precisión mayor sobre los otros ensayos y no requerir cuidados especiales de seguridad o cualquier accesorio para su aplicación (como por ejemplo el examen de rayos X), presenta como desventaja el uso de bloques patrones, de bloques de referencia y la necesidad imperante de personal calificado con grandes conocimientos teóricos y experiencia. El factor humano tiene gran importancia en la localización, evaluación del tamaño e interpretación de las discontinuidades encontradas.

La literatura muestra varios accidentes importantes causados por fallas del inspector durante el uso de la técnica de ultrasonido. Las trincas por corrosión intergranular que no fueron encontradas durante una inspección ultrasónica en la *Nine Mile Point Nuclear Plant* en 1981 tuvieron un gran impacto en la industria nuclear. Ellas fueron halladas después por inspección visual (ASME, 2001).

Como aparece documentado en el informe NTSB/AAR-98-01 del Consejo de Seguridad Nacional del Transporte en los Estados Unidos (NTSB), dos pasajeros murieron en el vuelo *Delta* 1288 como resultado de la falla de una máquina durante el levantamiento del vuelo en Pensacola, Florida, el día 6 de julio de 1998 (NTSB, 1998). El accidente fue atribuido a la falla en el sistema de END para detectar trincas en la máquina JT-8D.

Informes – NTSB/AAR-90/06 – relacionados con las fallas de los sistemas de END incluyen el desastre ocurrido el día 17 de julio de 1989 en *Sioux City* en la aerolínea americana *United Airlines* (NTSB, 1990).

Estos ejemplos y otros enfatizan la importancia de la implementación de metodologías cualitativas y cuantitativas que permitan profundizar en la cuestión de la confiabilidad en los END.

El uso y dominio del procedimiento que utiliza el inspector, así como las prácticas y el entrenamiento, constituyen los factores más críticos para la confiabilidad de los resultados del ensayo no destructivo por ultrasonido (More, 2004).

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en hacer un análisis del procedimiento de END por ultrasonido. Este procedimiento PR-011 (1993) elaborado por expertos brasileños es el que fija las condiciones exigibles y prácticas recomendadas durante la realización de este ensayo en Brasil. Se basa en un estudio de extracción de conocimiento realizado a 9 expertos para obtener los datos sobre las posibilidades de falla durante la ejecución de cada una de las tareas que forman parte del procedimiento. Para obtener las *posibilidades de falla borrosa* por tarea las opiniones son agregadas con ayuda del modelo creado por Hsu y Chen (1996). Con esto tendremos la relación de las tareas más susceptibles a fallas humanas.

Finalmente, haciendo un análisis de incidencias de los procesos cognitivos del hombre en la ejecución del procedimiento PR - 011 (causa – efecto) conoceremos cuales son los elementos cognitivos que más inciden en las tareas de mayor susceptibilidad para las fallas humanas. Esta información será útil para la creación de estrategias de entrenamiento.

## 2. MODELO

El modelo de Hsu y Chen (1996) realiza la combinación de los pronósticos individuales de cada experto. En primer lugar, se calcula un grado de concordancia entre opiniones de cada dos especialistas para generar una matriz de concordancia. Después se determina la concordancia relativa entre las opiniones de los expertos, se calcula el coeficiente de consenso y, conjuntamente con el peso que se le da a cada especialista, es obtenido el valor *fuzzy* (en términos de posibilidad de falla) de cada tarea del procedimiento. La metodología utilizada para el uso del modelo aparece descrita a continuación.

1. Identificar el conjunto de tareas que forma parte del procedimiento PR - 011. Las tareas son las siguientes:

- b1. Calibración. Verificar la linealidad vertical del equipo.
- b2. Calibración. Verificar la linealidad horizontal del equipo.
- b3. Solicitar informaciones sobre la pieza.
- b4. Escoger el bloque de referencia en función de la espesura.
- b5. Escoger el cabezote y el ángulo.
- b6. Escoger la frecuencia.
- b7. Preparar la superficie de la pieza.

- b8. Determinar las pérdidas por transferencia.
  - b9. Determinar la sensibilidad correcta para la barredura.
  - b10. Usar las técnicas de barredura especificadas en el procedimiento.
  - b11. Determinar el área de barredura.
  - b12. Examinar correctamente el área de barredura.
  - b13. Localizar las discontinuidades existentes en la dirección longitudinal de la soldadura.
  - b14. Localizar las discontinuidades existentes en la dirección transversal de la soldadura.
  - b15. Localizar las discontinuidades en la dirección de la profundidad.
  - b16. Dimensionar las discontinuidades existentes.
  - b17. Evaluar las reflexiones de la raíz de la soldadura.
  - b18. Determinar si la pieza debe ser rechazada según el criterio de aceptación.
  - b19. Hacer el informe sobre las discontinuidades, localización, dimensión y clasificación.
2. Establecer el comité de expertos que evaluará las posibilidades de falla humana durante la ejecución del procedimiento.

Esta etapa es muy importante. Martino (1983), Preble (1984) y Taylor (1988) realizaron estudios indicando que en áreas donde es requerida la opinión de los expertos, el factor más crítico se refiere a la selección de estos. Ellos constituyen los sensores de la información. En este caso fueron escogidos por su experiencia, práctica y nivel de conocimiento sobre este tipo de ensayo no destructivo. En total resultaron 9 (nueve) expertos - A, B, C, D, E, F, G, H e I.

3. Determinar la importancia relativa de cada experto.

Como la información obtenida de los expertos es heterogénea y depende del nivel de conocimiento, preparación, vivencias e intuición de estos, es necesario dar un grado de importancia relativa a cada uno de ellos de forma tal que la información extraída sea ponderada. Para ello, utilizamos un cuestionario de identificación elaborado por Moré (2004).

El cuestionario considera aspectos como la experiencia, la participación en eventos o congresos, cantidad de procedimientos elaborados, cantidad de procedimientos calificados, el entendimiento sobre la

técnica de ensayo, el grado de escolaridad y los cursos impartidos sobre este tipo de ensayo.

4. Seleccionar los valores lingüísticos apropiados para describir el conocimiento vago o impreciso.

Los valores lingüísticos que se presentan como alternativas a escoger por los expertos de forma tal que puedan evaluar los niveles de fallas en cada tarea del procedimiento son: *muy baja, baja, ligeramente baja, moderada, ligeramente alta, alta, muy alta*.

5. Escoger las funciones de pertenencia más adecuadas para capturar la vaguedad de las estimaciones.

Los niveles de fallas estarán representados por los números borrosos triangulares (NBT) indicados en la Tabla 1.

<b>Nivel de falla</b>	<b>NBT</b>
Muy alta (MA)	(5;6;6)
Alta (A)	(4;5;6)
Ligeramente alta (LA)	(3;4;5)
Moderada (M)	(2;3;4)
Ligeramente baja (LB)	(1;2;3)
Baja (B)	(0;1;2)
Muy baja (MB)	(0;0;1)

Tabla 1. Niveles de fallas

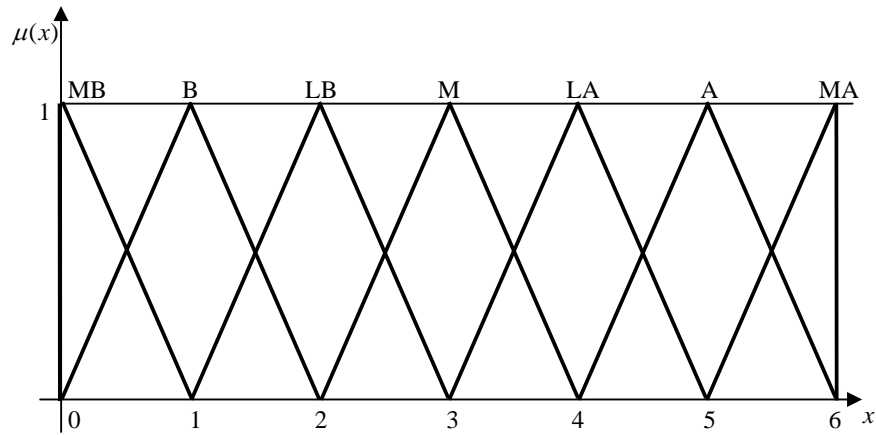


Figura 1. Representación de los NBT de la Tabla 1

6. Realizar las entrevistas a los expertos con el objetivo de conocer cuáles son las posibilidades de falla humana durante la ejecución de cada una de las tareas del procedimiento.

En la Tabla 2 aparecen las opiniones de los expertos (A, B, C, D, E, F, G, H e I) en relación a las posibilidades de falla por tarea (b1, b2,..., bi,..., b19) representadas por los números borrosos triangulares.

7. Agregar las opiniones utilizando el modelo de Hsu y Chen (1996).

Este modelo representado en las siguientes seis etapas constituye un método de agregación de opiniones.

7.1. Calcular el grado de concordancia  $C(N_i, N_j)$  combinándose las opiniones de los expertos  $i$  y  $j$  a través de la razón entre el área de intersección entre ellos y el área total de sus funciones de pertenencias.

$$C(N_i, N_j) = \frac{\int_x \min(\mu_{\tilde{A}_i}(x), \mu_{\tilde{A}_j}(x)) dx}{\int_x \max(\mu_{\tilde{A}_i}(x), \mu_{\tilde{A}_j}(x)) dx} \quad (1)$$



Tarea	A	B	C	D	E	F	G	H	I
<b>b1</b>	(1;2;3)	(2;3;4)	(2;3;4)	(2;3;4)	(2;3;4)	(0;1;2)	(1;2;3)	(2;3;4)	(2;3;4)
<b>b2</b>	(1;2;3)	(3;4;5)	(3;4;5)	(2;3;4)	(2;3;4)	(0;1;2)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b3</b>	(0;0;1)	(3;4;5)	(3;4;5)	(3;4;5)	(3;4;5)	(3;4;5)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b4</b>	(1;2;3)	(2;3;4)	(3;4;5)	(3;4;5)	(3;4;5)	(0;1;2)	(0;0;1)	(2;3;4)	(2;3;4)
<b>b5</b>	(0;1;2)	(2;3;4)	(1;2;3)	(3;4;5)	(3;4;5)	(0;1;2)	(0;0;1)	(1;2;3)	(2;3;4)
<b>b6</b>	(0;1;2)	(2;3;4)	(0;1;2)	(3;4;5)	(3;4;5)	(0;1;2)	(0;0;1)	(1;2;3)	(2;3;4)
<b>b7</b>	(0;1;2)	(1;2;3)	(0;1;2)	(2;3;4)	(2;3;4)	(1;2;3)	(0;0;1)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b8</b>	(1;2;3)	(3;4;5)	(4;5;6)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(0;1;2)	(2;3;4)	(2;3;4)
<b>b9</b>	(1;2;3)	(3;4;5)	(4;5;6)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(0;1;2)	(1;2;3)	(2;3;4)
<b>b10</b>	(0;0;1)	((4;5;6))	(3;4;5)	((4;5;6))	(4;5;6)	(0;1;2)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b11</b>	(0;0;1)	(3;4;5)	(2;3;4)	(3;4;5)	(3;4;5)	(0;1;2)	(0;1;2)	(2;3;4)	(2;3;4)
<b>b12</b>	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(0;1;2)	(2;3;4)	(2;3;4)
<b>b13</b>	(0;1;2)	(3;4;5)	(3;4;5)	(4;5;6)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b14</b>	(3;4;5)	(3;4;5)	(5;6;6)	(5;6;6)	(5;6;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b15</b>	(3;4;5)	(3;4;5)	(4;5;6)	(5;6;6)	(5;6;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(2;3;4)	(2;3;4)
<b>b16</b>	(2;3;4)	(4;5;6)	(4;5;6)	(4;5;6)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b17</b>	(2;3;4)	(4;5;6)	(5;6;6)	(5;6;6)	(5;6;6)	(3;4;5)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b18</b>	(0;1;2)	(2;3;4)	(3;4;5)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(0;1;2)	(3;4;5)	(2;3;4)
<b>b19</b>	(0;1;2)	(3;4;5)	(3;4;5)	(4;5;6)	(4;5;6)	(0;1;2)	(0;1;2)	(2;3;4)	(2;3;4)

Tabla 2. Opiniones de los expertos sobre las posibilidades de fallas

7.2. Construir la matriz de concordancia MC a partir de los grados de concordancia entre cada par de expertos.

$$MC = \begin{bmatrix} 1 & C_{12} \dots C_{1j} \dots C_{1n} \\ C_{i1} & C_{i2} \dots C_{ij} \dots C_{in} \\ C_{n1} & C_{n2} \dots C_{nj} \dots C_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde  $C_{ij} = C(N_i, N_j)$  si  $i \neq j$  y  $C_{ij} = 1$ , si  $i = j$ .

Después de la construcción de esta matriz se debe observar lo siguiente:

- a) En el caso que  $C_{ij} = 0$ , (no hay intersección entre las opiniones del experto  $i$  y las opiniones del experto  $j$ ) se debe obtener más informaciones de estos con el objetivo de que exista alguna convergencia entre sus opiniones, o sea, llegar a una intersección no vacía.
- b) Después de obtenidas las nuevas informaciones, si persisten las opiniones, habrá que considerar este grado de concordancia nulo.

7.3. Calcular la concordancia relativa: a través de los datos obtenidos en MC se calcula la concordancia relativa de cada experto ( $CR_i$ ) mediante la media cuadrática del grado de concordancia entre ellos.  $CR_i$  es un número real.

$$CR_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n C_{ij}^2} \quad (3)$$

7.4. Calcular el grado de concordancia relativa  $GCR_i$  de un experto en relación a los otros, a partir de la media ponderada de  $CR_i$  de cada experto.  $GCR_i$  es un número real.

$$GCR_i = \frac{CR_i}{\sum_{i=1}^n CR_i} \quad (4)$$

7.5. Se procede a calcular el coeficiente de consenso obtenido para cada experto  $CCE_i$  (número real), el cual considera el peso del experto  $P_{E_i}$  y el grado de concordancia relativa  $GCR_i$  de cada experto.

$$CCE_i = \frac{GCR_i * P_{E_i}}{\sum_{j=1}^n (GCR_j * P_{E_j})} \quad (5)$$

7.6. Se obtiene el valor final borroso  $\tilde{N}_i$  que representa la posibilidad existente de falla durante la ejecución de la tarea  $i$  analizada (los resultados aparecen en la Tabla 3).

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^N (CCE_i \bullet \tilde{N}_i) \quad (6)$$

Donde  $(\bullet)$  es el producto algebraico borroso.

8. Utilizar el criterio de orden basado en el número real asociado a un NBT (Kaufmann y Gil Aluja, 1987).

Dado  $\tilde{N} = (a_1, a_2, a_3)$ , su número real asociado es  $n = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$  (criterio de defuzzificación). Cuanto mayor sea el número real asociado, mayor será el NBT, con lo cual se estarían eligiendo las tareas más susceptibles a fallas humanas.

9. Definición de las tareas más susceptibles a fallas humanas.

En la Tabla 3 aparecen las tareas con los valores borrosos y reales. Según el principio de Pareto, el 20% de las causas de un problema en un sistema es responsable por el 80% de los efectos ocasionados (Koch, 2002). De modo que el 20% de 19 tareas resulta un conjunto de aproximadamente 4 tareas. Las tareas más significativas son: b14. Localizar las discontinuidades existentes en la dirección transversal de la soldadura; b15. Localizar las discontinuidades en la dirección de la profundidad; b16. Dimensionar las discontinuidades existentes y b17. Evaluar las reflexiones de la raíz de la soldadura. Sobre ellas cae el peso mayor de las posibilidades de fallas existentes en el sistema estudiado, de ahí que se deba prestar mayor atención a la práctica de estas durante el entrenamiento de los inspectores.

<b>Tarea</b>	<b>NBT</b>	<b>N° real asociado</b>
<b>b1</b>	(1.98, 3, 4)	2.99
<b>b2</b>	(1.76, 2.8, 3.8)	2.79
<b>b3</b>	(2.75, 3.7, 4.7)	3.71
<b>b4</b>	(2.1, 3, 4)	3.02
<b>b5</b>	(1.41, 2, 3.4)	2.40
<b>b6</b>	(1.16, 2.1, 3.1)	2.11
<b>b7</b>	(1.3, 2.2, 3.2)	2.22
<b>b8</b>	(2.5, 3.5, 4.5)	3.5
<b>b9</b>	(2.33, 3.3, 4.3)	3.30
<b>b10</b>	(2.59, 3.5, 4.5)	3.52
<b>b11</b>	(1.91, 2.9, 3.9)	2.90
<b>b12</b>	(1.85, 2.9, 3.9)	2.88
<b>b13</b>	(2.86, 3.9, 4.9)	3.89
<b>b14</b>	(3.69, 4.7, 5.3)	<b>4.59</b>
<b>b15</b>	(3.33, 4.3, 5.1)	<b>4.25</b>
<b>b16</b>	(3.46, 4.5, 5.5)	<b>4.49</b>
<b>b17</b>	(3.61, 4.6, 5.2)	<b>4.5</b>
<b>b18</b>	(2.03, 3, 4)	3.0
<b>b19</b>	(2.01, 3, 4)	3.0

Tabla 3. NBT y número real asociado de posibilidades de fallas por tarea del procedimiento PR-011

Se puede observar que los valores se superponen. Por ejemplo para la tarea b14 el valor 4.59 significa que la posibilidad de falla humana durante la ejecución de esta tarea posee grado de pertenencia de 0.59 al conjunto borroso “Alta” debido a que  $y = x - 4$  es la función de pertenencia por la izquierda de este conjunto borroso. Al mismo tiempo posee grado de pertenencia de 0.41 al conjunto borroso “Ligeramente Alta” dado que la función por derecha de este conjunto borroso es  $y = 5 - x$ .

Observamos que las tareas más susceptibles a fallas humanas están relacionadas con funciones de localización en diferentes direcciones, dimensionado y evaluación. Drury (2000) llegó a conclusiones similares llegó al realizar un estudio sobre el ensayo no destructivo utilizando líquidos fluorescentes.

### **3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y ESTUDIO DE INCIDENCIAS**

Con el objetivo de mejorar la confiabilidad de los procesos que forman parte de este tipo de ensayo no destructivo es imprescindible hacer un estudio de los factores que más contribuyen a la posibilidad de falla humana durante la ejecución del procedimiento técnico de ultrasonido.

Cuando observamos las tareas b14, b15, b16 y b17 nos percatamos que están relacionadas con la capacidad cognitiva del inspector. Para localizar, dimensionar y evaluar se requiere de niveles adecuados de sensación, percepción, memorización, interpretación y toma de decisión.

El concepto de incidencia está asociado a la idea del efecto de un conjunto de entidades sobre otro conjunto de entidades o sobre sí mismo (Kaufmann y Gil Aluja, 1989). En un ensayo no destructivo por ultrasonido, la ejecución de acciones humanas por el operador está relacionada con siete aspectos cognitivos: habilidades motoras, coordinación ojos-manos, capacidad de visión, necesidad de percepción, necesidad de procesamiento de la información, nivel de memorización y necesidad de toma de decisión (More, 2004).

Es necesario hacer un estudio de incidencias. Se parte de la siguiente hipótesis: si se dispone del nivel de incidencia de los aspectos cognitivos en la ejecución del procedimiento (medido en cada tarea a través de las acciones humanas) es posible crear estrategias de entrenamiento dirigidas a mejorar aquellos que más estarían contribuyendo a la falla humana.

Resulta interesante estudiar de manera cualitativa las incidencias que permiten investigar diversos mecanismos de causa a efecto que no es posible descubrir a través de la intuición o la experiencia.

#### **3.1. Determinación de las causas**

En la Figura 2 representamos, esquemáticamente, cómo ocurre el procesamiento de la información. Toda información que recibe el hombre del ambiente (iluminación, calor, ruido, etc) llega a los órganos

sensoriales. Estos se encargan de crear una impresión en la mente provocada por las cosas que llegan a nuestros sentidos (olfato, audición, gusto, tacto, vista). Esta impresión es lo que se conoce como **sensación**.

La etapa de **percepción** envuelve la creación de una sensación a partir de la extracción de informaciones del ambiente. Esta extracción puede ser realizada a través de cambios en el medio o a través de conocimiento y expectativas respecto de una situación. Estos datos son asimilados por elementos de **memoria** necesarios para realizar una operación. También existen elementos de memoria almacenada que están relacionados con la experiencia o con la cantidad de práctica y entrenamiento realizada por el operador. La **toma de decisión** ocurre después de ser interpretada la información, es decir, después de ser construido un modelo lógico coherente que justifique lo que está siendo observado. Durante este proceso, el conocimiento es utilizado en la elaboración de un modelo situacional que es modificado a cada instante.

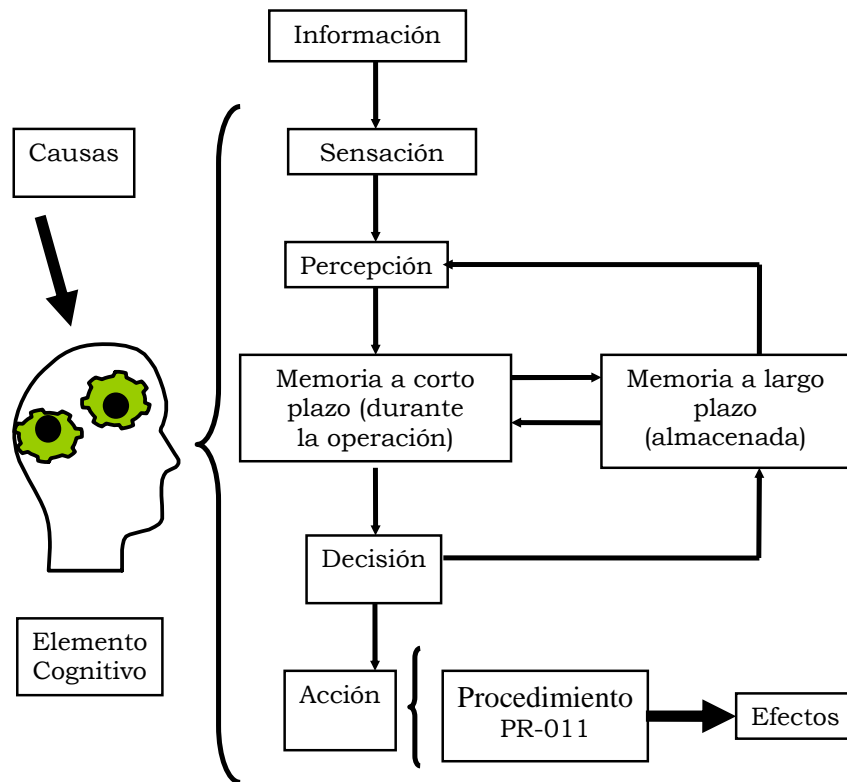


Figura 2. Procesamiento de la información (Stephens, 2000)

Antes de ejecutar la acción (en dependencia de la tarea del procedimiento), el hombre utiliza el modelo situacional en la identificación de los objetivos y en la selección de la respuesta adecuada a la situación. Esta fase es conocida como planeamiento de la acción. La respuesta se refiere a la ejecución de la acción planeada.

Al evaluar las causas que provocan una posibilidad de falla humana, en este trabajo se consideran los elementos o aspectos cognitivos:

- a1. Habilidades motoras;
- a2. Coordinación ojos – manos;
- a3. Capacidad de visión;

- a4. Percepción;
- a5. Procesamiento de la información;
- a6. Capacidad de memorizar y
- a7. Toma de decisión.

### **3.2. Determinación de los efectos**

Una vez determinadas las causas debemos entender que en el caso de un inspector que utiliza la técnica ultrasónica para evaluar el estado de la soldadura, su acción final deberá estar en correspondencia con las tareas o acciones descritas en un procedimiento. Estas acciones ya fueron descritas anteriormente ( $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_{19}$ ) y la ejecución de ellas en forma correcta o incorrecta constituye los efectos.

### **3.3. Estudio de incidencias**

#### **3.3.1. Matriz causa - causa**

La introducción de una evaluación matizada entre 0 y 1 permite evaluar niveles de verdad en la noción de incidencia del aspecto cognitivo. De esta forma, podemos establecer una correspondencia semántica con la ayuda del nivel de verdad de la proposición:

P: existe una incidencia

Con  $V(P) = 0.0$ , baja.

= 0.1, prácticamente baja.

= 0.2, casi baja.

= 0.3, bastante baja.

= 0.4, más baja que alta.

= 0.5, ni baja ni alta.

= 0.6, más alta que baja.

= 0.7, bastante alta.

= 0.8, casi alta.

= 0.9, prácticamente alta.

= 1.0, alta.

La introducción de matices permite un mejor reflejo del pensamiento humano (Kaufmann y Gil Aluja, 1989). Un factor cognitivo tiene siempre una incidencia alta sobre sí mismo y una incidencia que varía



entre 0 y 1 sobre los otros factores cognitivos. Con ayuda de los expertos creamos la matriz de incidencias  $\tilde{A}$  de cada causa sobre las demás causas.

$\tilde{A}$	<b>a1</b>	<b>a2</b>	<b>a3</b>	<b>a4</b>	<b>a5</b>	<b>a6</b>	<b>a7</b>
<b>a1</b>	1	0.8	0	0.2	0.4	0	0.6
<b>a2</b>	0.6	1	0.1	0.9	0.9	0.1	0.7
<b>a3</b>	0	0.8	1	0.7	0.6	0.4	0.9
<b>a4</b>	0.2	0.4	0	1	0.9	0.1	0.9
<b>a5</b>	0.2	0.1	0	0.2	1	0	1
<b>a6</b>	0.1	0	0	0	0.7	1	0.5
<b>a7</b>	0	0.6	0	0	0.1	0	1

Tabla 4. Matriz de incidencia de cada causa sobre las demás causas

**3.3.2. Matriz causa – efecto**

<b>m</b>	<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>b<sub>11</sub></b>	<b>b<sub>12</sub></b>	<b>b<sub>13</sub></b>	<b>b<sub>14</sub></b>	<b>b<sub>15</sub></b>	<b>b<sub>16</sub></b>	<b>b<sub>17</sub></b>	<b>b<sub>18</sub></b>	<b>b<sub>19</sub></b>
<b>a<sub>1</sub></b>	0.7	0.4	0	0	0	0	0.6	0.9	0.7	0.9	0	0.6	0.8	0.9	0.9	1	1	0	0.3
<b>a<sub>2</sub></b>	0.8	0.3	0	0	0	0	0.5	1	0.8	0	0	0.4	1	1	1	1	1	0	0.1
<b>a<sub>3</sub></b>	0.9	0.9	0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.8	0.8	0	0	0.1	0.9	0.9	0.9	1	0.9	0	0
<b>a<sub>4</sub></b>	0	0	0	0.3	0.6	0.6	0.8	0	0	0	0.3	0	0.9	0.9	0.9	0	1	0	0
<b>a<sub>5</sub></b>	0.7	0.8	0	0.2	0.1	0.1	0	0.8	0.6	0	0.7	0	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.8	0.2
<b>a<sub>6</sub></b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0.4
<b>a<sub>7</sub></b>	0.1	0.2	0.5	0.1	0.6	0.6	0.9	0.1	0.2	0	0.2	0	0.9	0.9	0.9	0.6	1	1	0.5

Tabla 5. Matriz causa - efecto

En la Tabla 5 aparecen las valuaciones hechas por los expertos. En esta matriz  $\tilde{M}$  aparecen representados los niveles de incidencia de los factores cognitivos sobre la ejecución de las tareas del procedimiento.

### 3.3.3. Matriz efecto – efecto

La matriz de incidencias directas  $\tilde{B}$  de cada efecto sobre los demás efectos (incidencia de un conjunto de tareas en el mismo conjunto), creada a partir del conocimiento de los expertos, es una matriz de 19 filas por 19 columnas.

$\tilde{B}$	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10
b1	1	0	0	0.1	0	0	0	0.3	0.5	0
b2	0	1	0	0	0	0	0	0.9	0.8	0
b3	0	0	1	0.7	0.8	0.8	0.7	0.3	0.4	0.3
b4	0	0	0	1	0.2	0.2	0.2	0.9	0.9	0.2
b5	0	0	0	0	1	0.5	0.4	0.5	0.6	0.8
b6	0	0	0	0	0	1	0.3	0.3	0.3	0.1
b7	0	0	0	0	0	0	1	0.4	0.7	0.2
b8	0	0	0	0	0	0	0	1	0.6	0.1
b9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
b10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
b11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6. Matriz efecto-efecto

$\tilde{B}$	<b>b11</b>	<b>b12</b>	<b>b13</b>	<b>b14</b>	<b>b15</b>	<b>b16</b>	<b>b17</b>	<b>b18</b>	<b>b19</b>
<b>b1</b>	0.1	0.6	0.7	0.9	1	0.8	0.9	0.7	0.4
<b>b2</b>	0	0.3	0.2	0.2	0.2	0.9	0.9	1	0.4
<b>b3</b>	0.7	0.3	0.3	0.6	0.6	0.3	0.8	0.8	0.8
<b>b4</b>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	0.6
<b>b5</b>	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	0.7	0.4
<b>b6</b>	0	0	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.4	0.2
<b>b7</b>	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.1
<b>b8</b>	0	0.4	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.9	0.4
<b>b9</b>	0	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	1	0.3
<b>b10</b>	0.3	0.7	0.5	0.6	0.5	0.2	0.4	0.8	0.4
<b>b11</b>	1	0.8	0.6	0.6	0.6	0.3	0.5	0.6	0.6
<b>b12</b>	0	1	1	1	1	0.3	0.9	0.6	0.4
<b>b13</b>	0	0	1	0	0.1	0.5	0.6	0.9	0.6
<b>b14</b>	0	0	0	1	0.3	0.7	0.7	0.9	0.6
<b>b15</b>	0	0	0	0	1	0.5	0.8	0.9	0.6
<b>b16</b>	0	0	0	0	0	1	0.6	0.9	0.7
<b>b17</b>	0	0	0	0	0	0	1	1	0.7
<b>b18</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0.8
<b>b19</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabla 6. Matriz efecto – efecto (continuación)

**3.3.4. Incidencias acumuladas y efectos de segunda generación**

Para obtener los efectos acumulados de primera y segunda generación bastará calcular mediante la composición *max-min* entre  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{M}$  y  $\tilde{B}$  una nueva matriz de incidencia borrosa  $\tilde{Z} = \tilde{A} \circ \tilde{M} \circ \tilde{B}$  (Kaufmann y Gil Aluja. 1989), es decir, una matriz de incidencias acumuladas.

<b>Z</b>	<b>b<sub>1</sub></b>	<b>b<sub>2</sub></b>	<b>b<sub>3</sub></b>	<b>b<sub>4</sub></b>	<b>b<sub>5</sub></b>	<b>b<sub>6</sub></b>	<b>b<sub>7</sub></b>	<b>b<sub>8</sub></b>	<b>b<sub>9</sub></b>	<b>b<sub>10</sub></b>	<b>b<sub>11</sub></b>	<b>b<sub>12</sub></b>	<b>b<sub>13</sub></b>	<b>b<sub>14</sub></b>	<b>b<sub>15</sub></b>	<b>b<sub>16</sub></b>	<b>b<sub>17</sub></b>	<b>b<sub>18</sub></b>	<b>b<sub>19</sub></b>
<b>a<sub>1</sub></b>	0.8	0.4	0.5	0.2	0.6	0.6	0.6	0.9	0.8	0.9	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	1	1	0.6	0.5
<b>a<sub>2</sub></b>	0.8	0.8	0.5	0.3	0.6	0.7	0.8	1	0.8	0.6	0.7	0.6	1	1	1	1	1	0.8	0.5
<b>a<sub>3</sub></b>	0.9	0.9	0.5	0.3	0.6	0.7	0.9	0.8	0.8	0.4	0.6	0.4	0.9	0.9	0.9	1	0.9	0.9	0.5
<b>a<sub>4</sub></b>	0.7	0.8	0.5	0.3	0.6	0.7	0.9	0.8	0.6	0.2	0.7	0.4	0.9	0.9	0.9	0.6	1	0.9	0.5
<b>a<sub>5</sub></b>	0.7	0.8	0.5	0.2	0.6	0.7	0.9	0.8	0.6	0.2	0.7	0.2	0.9	0.9	0.9	0.6	1	1	0.5
<b>a<sub>6</sub></b>	0.7	0.7	0.5	0.2	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0.5	0.7	0.2	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5
<b>a<sub>7</sub></b>	0.6	0.3	0.5	0.1	0.6	0.7	0.9	0.6	0.6	0	0.2	0.4	0.9	0.9	0.9	0.6	1	1	0.5

Tabla 7. Matriz de incidencias acumuladas

Finalmente, se separan las incidencias directas mediante el cálculo de la matriz  $\tilde{Z} - \tilde{M}$  (Tabla 8). De esta forma, se obtiene la matriz de efectos de segunda generación.

$\tilde{Z} - \tilde{M}$	$\mathbf{b}_1$	$\mathbf{b}_2$	$\mathbf{b}_3$	$\mathbf{b}_4$	$\mathbf{b}_5$	$\mathbf{b}_6$	$\mathbf{b}_7$	$\mathbf{b}_8$	$\mathbf{b}_9$	$\mathbf{b}_{10}$	$\mathbf{b}_{11}$	$\mathbf{b}_{12}$	$\mathbf{b}_{13}$	$\mathbf{b}_{14}$	$\mathbf{b}_{15}$	$\mathbf{b}_{16}$	$\mathbf{b}_{17}$	$\mathbf{b}_{18}$	$\mathbf{b}_{19}$
$\mathbf{a}_1$	0.1	0	0.5	0.2	0.6	0.6	0	0	0.1	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0.6	0.2
$\mathbf{a}_2$	0	0.5	0.5	0.3	0.6	0.7	0.3	0	0	0.6	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0.8	0.4
$\mathbf{a}_3$	0	0	0.5	0.1	0.4	0.5	0.4	0	0	0.4	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0.9	0.5
$\mathbf{a}_4$	0.7	0.8	0	0	0	0.4	0.1	0.8	0.6	0.2	0.4	0.4	0	0	0	0.6	0	0.9	0.5
$\mathbf{a}_5$	0	0	0.5	0	0.5	0.6	0.9	0	0	0.2	0	0.2	0.3	0.3	0.1	0	0.4	0.2	0.3
$\mathbf{a}_6$	0.7	0.7	0.5	0.2	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0	0.7	0	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.1
$\mathbf{a}_7$	0.5	0.1	0	0	0	0	0	0.5	0.4	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0

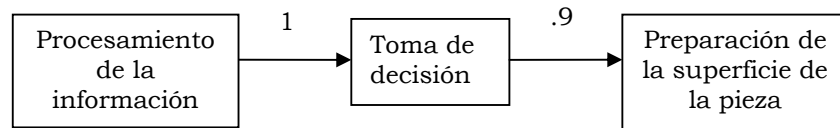
Tabla 8. Matriz de efectos de segunda generación

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

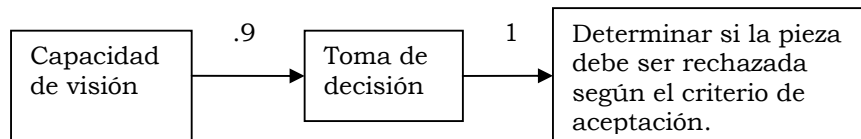
La matriz  $\tilde{Z} - \tilde{M}$  pone de manifiesto los efectos de segunda generación. Un valor cero indica que no existe efecto acumulado; en cambio un valor próximo a uno muestra la presencia de un efecto no tenido en cuenta.

Procedemos a analizar los valores Tabla 8 con grado igual o superior a 0.8 con el propósito de enviar la información a los expertos para su reconsideración. De esta forma, la gerencia debe considerar las informaciones provenientes de las incidencias directas (Tabla 5) y las incidencias a través de algunos de los elementos intermedios.

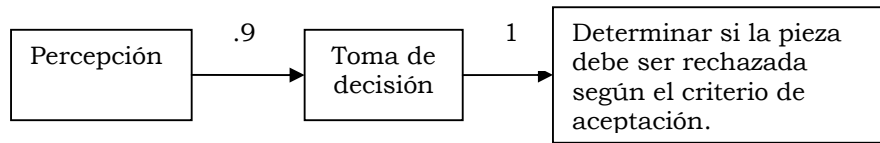
Se constata la incidencia que existe de a5 (procesamiento de la información) en b7 (preparación de la superficie de la pieza). La incidencia intermedia es sobre a7 (toma de decisión). Al interpretar este resultado, se observa que el inspector debe procesar toda la información que tiene respecto de la pieza que va a evaluar. Este procesamiento tiene una incidencia alta en la toma de decisión sobre la forma en que irá a preparar (pulir) la superficie de la pieza y, finalmente, proceder a ejecutar dicha preparación.



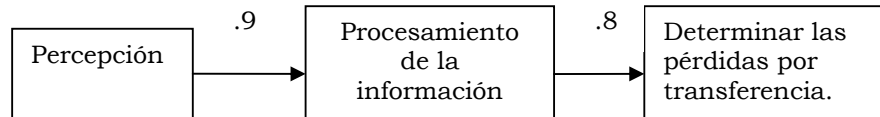
Se observa la incidencia que existe del factor cognitivo a3 (capacidad de visión) sobre la acción de procedimiento b18 (determinar si la pieza es rechazada según el criterio de aceptación). Es cierto que *a priori* podríamos no observar alguna relación de causalidad, pero analizando el modelo con más detalle podemos concluir que se necesita tener una buena capacidad de visión para poder tomar una decisión (a7) y finalmente determinar si la pieza debe ser rechazada según el criterio de aceptación (b18).



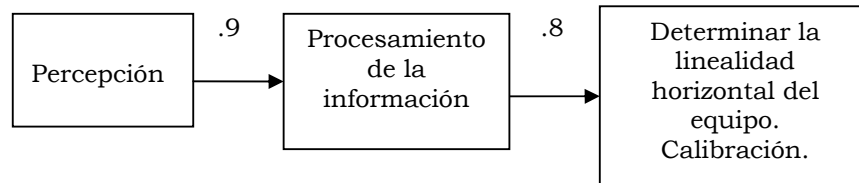
El factor cognitivo a4 (percepción) incide sobre la acción del procedimiento b18 (determinar si la pieza debe ser rechazada según el criterio de aceptación) a través de una incidencia intermedia sobre el factor cognitivo a7 (tomar una decisión).



Se advierte la incidencia que existe del factor cognitivo a4 (percepción) sobre la acción de procedimiento b8 (determinar las pérdidas por transferencia). La incidencia intermedia es sobre a5 (procesamiento de la información). Al interpretar este resultado podemos decir que el inspector, antes de determinar las pérdidas por transferencia, va a tener creada una sensación, a partir de las informaciones extraídas en las siete primeras acciones del procedimiento, la cual va a incidir en la etapa de procesamiento de la información.



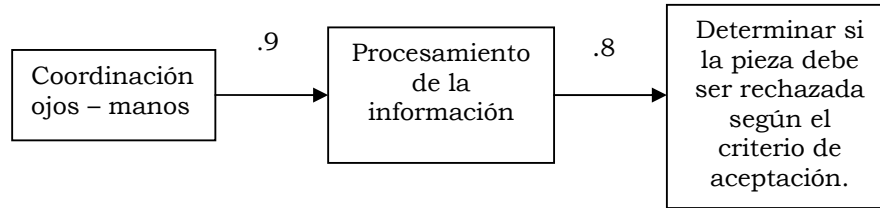
Hay una incidencia del factor cognitivo a4 (percepción) sobre la acción del procedimiento b2 (calibración-verificar la linealidad horizontal del equipo) a través de una incidencia intermedia sobre el factor cognitivo a5 (procesamiento de la información).



En principio fue determinado que no existe una relación de causalidad directa del factor cognitivo a2 sobre la acción del procedimiento b18, pero a través del modelo utilizado detectamos que existe una relación de forma indirecta. El factor cognitivo a2 (coordinación ojos-manos) incide sobre otro elemento cognitivo a5 (procesamiento de la



información) y este a su vez sobre la acción del procedimiento b18 (determinar si la pieza debe ser rechazada según el criterio de aceptación).



Las valuaciones hechas por los expertos en la Tabla 5 y los efectos olvidados que aparecen en la Tabla 8 nos permiten hacer análisis sobre las incidencias de los factores cognitivos (a1, a2, a3, a4, a5, a6 y a7) en la ejecución de las tareas más susceptibles a la falla humana (b14, b15, b16 y b17). Vemos por este orden que los factores cognitivos más significativos son: la coordinación ojos-manos, las habilidades motoras y la capacidad de visión del inspector.

## 5. CONCLUSIONES

El ensayo no destructivo por ultrasonido es un examen complejo que se realiza con el objetivo de determinar la calidad de piezas conocidas como “piezas de responsabilidad” porque forman parte de equipos y dispositivos importantes para la seguridad de la industria (nuclear, aviación, naval, eléctrica, química, de procesos, etc.). Con la finalidad de analizar las relaciones de causalidad existentes entre los elementos cognitivos del inspector y las acciones humanas que forman parte del procedimiento que estos emplean, se han utilizado dos modelos (modelo de agregación de opiniones de Hsu y Chen modelo de los efectos olvidados establecido por los profesores Kaufmann y Gil Aluja).

Los resultados obtenidos muestran la “telaraña de incidencias” existente entre los factores que hoy en día se conocen como los mayores contribuyentes para la posibilidad de falla humana: los factores cognitivos. Nuevas estrategias de entrenamientos pueden ser creadas, las mismas deben estar acompañadas de tareas o tests que puedan medir las habilidades cognitivas de los inspectores durante la ejecución de las inspecciones, específicamente la coordinación ojos-manos las habilidades motoras y la capacidad de visión. Esto implica la participación de especialistas del área médica.

Como los recursos siempre son limitados, la identificación de las tareas más susceptibles a fallas humanas (b14. Localizar las discontinuidades existentes en la dirección transversal de la soldadura; b15. Localizar las discontinuidades en la dirección de la profundidad; b16. Dimensionar las discontinuidades existentes y b17. Evaluar las reflexiones de la raíz de la soldadura) nos permite conocer donde los instructores que ofrecen los entrenamientos a los inspectores deben detenerse y profundizar más para que los recursos (tiempo e información) sean optimizados.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ASME (2001). Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Appendix VIII.

Drury, C. G. (2000). "Human Factors Good Practices in Fluorescent Penetrant Inspection". The Human Factors in Aviation Maintenance and Inspection (HFAMI). <http://hfskyway.faa.gov/document.htm>.

Hsu, H-M.; Chen, C. T. (1996). "Aggregation of fuzzy opinions under group decision making". *Fuzzy Sets and Systems*. Vol 79 pp. 279-285.

Kaufmann, A.; Gil Aluja, J. (1987). *Técnicas operativas de gestión para el tratamiento de la incertidumbre*. Editorial Hispano Europea, Barcelona.

Kaufmann, A.; Gil Aluja, J. (1989). *Modelos para la investigación de efectos olvidados*. Editorial Milladoiro. Santiago de Compostela.

Koch, R. (2002). *O princípio* 80/20. Editora Rocco. P.272.

Lee, H. M. (1996). "Group decision making using fuzzy theory for evaluating the rate of aggregative risk in software development". *Fuzzy Sets and Systems*, Vol 80, pp. 261-271.

Martino, J. P. (1983). *Technological Forecasting for Decision Making* Elsevier, New York.

More, J. D. (2004). "A fuzzy approach to evaluation the human reliability in the ultrasonic nondestructive examinations". *Unpublished Doctoral dissertation*. Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE). Departament Materials and Metallurgical Engineering, Brazil.

NTSB/AAR-98/01. (1998). "National Transportation Safety Board Report".

NTSB/AAR-90/06 (1990). "National Transportation Safety Board Report".

PR-011 (1993). "Ultrason. Inspeção em soldas. Procedimento", SEQUI/QDOC.

Pueble, J. F. (1984). "The selection of Delphi panels for strategic planning purposes". *Strategic Management Journal*. Vol 5, pp.157-170.

Stephens, H. M. (2000) "NDE Reliability - Human Factors - Basic Considerations" In *15<sup>th</sup> WCNDT*, Roma.

Taylor, J. (1988). "Delphi method applied to turismo". In: Wittis Moutinho, L eds, *Tourism Marketing and Management Handbook*, Prentice Hall, New York, pp. 95-99.